

15.681/H/02

**TUGAS AKHIR  
( KL. 1702 )**



**STUDI KONFIGURASI BRACING KAKI JACK-UP  
DENGAN BEBAN GEMPA (SEISMIK)**



*Rske  
627.98  
Pr  
5-1  
2002*

Disusun Oleh :

**PRADINTIO ARIADI**

**NRP : 4397 100 052**

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA**

2002

|             |           |
|-------------|-----------|
| Tgl. Terbit | 20-3-2002 |
| Terima      | H         |
| No. Angket  | 219377    |



**STUDI KONFIGURASI BRACING KAKI JACK-UP  
DENGAN BEBAN GEMPA (SEISMIK)**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat  
Untuk Menyelesaikan Studi Program Sarjana**

**Pada**

**Jurusan Teknik Kelautan**

**Fakultas Teknologi Kelautan**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**Mengetahui / Menyetujui**

**Surabaya, Pebruari 2002**

**Dosen Pembimbing I**



**Ir. Jusuf Sutomo, MSc**

**NIP. 131 287 547**

**Dosen Pembimbing II**



**Ir. Murdjito, MSc. Eng**

**NIP. 132 149 376**



## ABSTRAK

*Penulisan Tugas Akhir ini dilatarbelakangi oleh keinginan penulis untuk mendapatkan referensi mengenai respon dan kekuatan ultimate berbagai konfigurasi bracing pada kaki Jack-Up tipe rangka (Truss) terhadap beban gempa guna menentukan bentuk konfigurasi yang sesuai.*

*Variasi konfigurasi bracing yang diamati adalah : bracing K, bracing Z, dan bracing X (cross). Data model Jack-Up mengacu pada ukuran Jack-Up Dyvi Gamma dengan mengambil lokasi operasi di perairan KE-23 Poleng Field lepas pantai sebelah barat Pulau Madura. Analisa struktur menggunakan piranti lunak GT. Strudl versi 25 dengan kriteria kekuatan mengacu pada API RP2A-LRFD. Pemodelan struktur dilakukan dengan Finite Element Method untuk detailed model. Perhitungan beban gelombang menggunakan teori Morisson dengan teori gelombang Stokes 2 order.*

*Dari hasil analisa respon struktur didapatkan bahwa displacement arah horizontal x, maupun z, dan vertikal y, menunjukkan harga yang paling kecil untuk model konfigurasi bracing X, yaitu untuk displasemen x senilai 0.086 meter, displasemen y senilai 0.0027 meter, dan displasemen z yang mendekati nol (0). Untuk analisa kekuatan ultimate, diperoleh bahwa tegangan pada bracing X menunjukkan harga yang paling kecil, di mana untuk tegangan Aksial sebesar 25.40 MPa, tegangan Bending sebesar 98.06 MPa, dan tegangan Geser sebesar 2.122 Mpa.*

*Kata Kunci : seismik, jack-up, bracing, analisa struktur*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah membimbing dan memberikan hamba – Nya cahaya, kenikmatan, serta kekuatan lahir dan batin sehingga pada akhirnya penulis mampu menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir ini dikerjakan guna memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi kesarjanaan Strata 1 (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dalam Tugas Akhir ini penulis mencoba untuk melakukan studi terhadap konfigurasi sistem *bracing* pada kaki *Jack-Up* tipe rangka akibat beban gempa yang terjadi di dasar laut. Dengan membandingkan hasil analisa yang didapatkan pada tiap model, maka dapat ditentukan bentuk *bracing* yang tahan gempa.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam Laporan Tugas Akhir ini, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan, di samping harapan bahwa Tugas Akhir ini bisa bermanfaat di masa mendatang.

Surabaya, Pebruari 2002

Pradintio Ariadi



## UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam proses penulisan Tugas Akhir ini, banyak pihak yang telah memberikan bantuan kepada penulis. Oleh sebab itu, maka pada kesempatan ini penulis dengan tulus ikhlas ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Kedua Orang Tua penulis : **Ayahanda Tardjani Muhadi, BA (Alm.)** dan **Ibunda Ani Mulyantini**, atas segala cinta, kasih sayang, serta doa yang tak pernah putus meski telah jauh
2. Adik Anggitio Aji Wirawan di Semarang, atas segala doa dan pengertiannya
3. Eyang di Tegal, serta Kakak – Kakak penulis : Mbak Listyowati sekeluarga, Mas Aji Herianto sekeluarga, Mas Her Purwanto sekeluarga, Mbak Hertuti sekeluarga, serta Mbak Hertiti; karena atas dukungan dan bantuan mereka-lah penulis bisa terus melanjutkan studi
4. Keluarga Besar Dharmawangsa : Pakdhe R. Jerry Sudyono, Budhe Meriatiningsih, Mas Dendi dan Mbak Neni, Mas Erwin dan Mbak Irma, Pakdhe Herry, Endang; atas segala dorongan, bantuan, perhatian, dan fasilitas yang diberikan kepada penulis selama ini
5. Bapak Ir. Jusuf Sutomo, MSc, selaku Dosen Wali sekaligus Dosen Pembimbing I atas segala bantuan yang diberikan
6. Bapak Ir. Murdjito, MSc.Eng, selaku Dosen Pembimbing II atas segala ilmu, bantuan, dan dorongan yang diberikan

## DAFTAR ISI

|   |          |
|---|----------|
| Lembar Pengesahan                               | ii       |
| Abstrak   | iii      |
| Kata Pengantar                                  | iv       |
| Ucapan Terima Kasih                             | v        |
| Daftar Isi                                      | viii     |
| Daftar Tabel                                    | x        |
| Daftar Gambar                                   | xi       |
| Daftar Lampiran                                 | xii      |
| Daftar Notasi                                   | xiii     |
| BAB I PENDAHULUAN                               | I – 1    |
| 1.1 Latar Belakang                              | I – 1    |
| 1.2 Perumusan Masalah                           | I – 2    |
| 1.3 Tujuan                                      | I – 3    |
| 1.4 Manfaat                                     | I – 3    |
| 1.5 Batasan Masalah                             | I – 3    |
| 1.6 Metodologi Penelitian                       | I – 5    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI      | II – 1   |
| 2.1 Tinjauan Pustaka                            | II – 1   |
| 2.2 Landasan Teori                              | II – 3   |
| 2.2.1 Perancangan Umum Struktur <i>Jack-Up</i>  | II – 3   |
| 2.2.2 Dasar – Dasar Analisa Dinamis             | II – 8   |
| 2.2.3 Gempa pada Bangunan Lepas Pantai          | II – 16  |
| 2.2.4 Kriteria Tegangan Ijin                    | II – 24  |
| BAB III PEMODELAN STRUKTUR DAN BEBAN            | III – 1  |
| 3.1 Dasar – Dasar Umum Pemodelan <i>Jack-Up</i> | III – 1  |
| 3.2 Model Acuan                                 | III – 2  |
| 3.3 Pemodelan Kaki                              | III – 3  |
| 3.4 Pemodelan Geladak                           | III – 7  |
| 3.5 Pemodelan Pondasi                           | III – 10 |
| 3.6 Properti Dinamis Struktur                   | III – 12 |



|   |          |
|---|----------|
| 3.6.1 Pemodelan Massa Struktur  | III – 12 |
| 3.6.2 Sambungan Kaki dengan Geladak                                   | III – 13 |
| 3.6.3 Interaksi Tanah dengan Kaki                                     | III – 14 |
| 3.7 Pembebanan pada Model <i>Jack-Up</i>                              | III – 16 |
| 3.7.1 Berat Struktur  | III – 17 |
| 3.7.2 Beban Gelombang   | III – 17 |
| 3.7.3 Beban Gempa Bumi  | III – 25 |
| BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN   | IV – 1   |
| 4.1 Analisa Respons dan Kekuatan <i>Ultimate</i>                      | IV – 1   |
| 4.1.1 Respons Model 1 Kaki terhadap Beban Gempa                       | IV – 2   |
| 4.1.2 Respons Model 1 Kaki terhadap Beban Kombinasi                   | IV – 4   |
| 4.1.3 Kekuatan <i>Ultimate</i> Model 1 Kaki                           | IV – 6   |
| 4.1.4 Analisa Model Global Struktur <i>Jack-Up</i>                    | IV – 8   |
| 4.2 Pembahasan  | IV – 10  |
| 4.2.1 Respons Kaki <i>Jack-Up</i> pada Kondisi Gempa                  | IV – 10  |
| 4.2.2 Kekuatan <i>Ultimate</i> Kaki <i>Jack-Up</i> pada Kondisi Gempa | IV – 11  |
| BAB V PENUTUP   | V – 1    |
| 5.1 Kesimpulan  | V – 1    |
| 5.2 Saran   | V – 2    |
| Daftar Pustaka  | xv       |
| Lampiran  |          |

## DAFTAR TABEL

|           |  | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Tabel 3.1 | Ukuran Utama <i>Member</i> Model Kaki <i>Jack-Up</i>               | III – 4 |
| Tabel 3.2 | <i>Slenderness &amp; Thickness Ratio</i> Model Kaki <i>Jack-Up</i> | III – 5 |
| Tabel 3.3 | Dimensi Model Geladak <i>Jack-Up</i>                               | III – 8 |
| Tabel 4.1 | Gaya Reaksi Sistem Pondasi Kaki pada Model Global                  | IV – 9  |
| Tabel 4.2 | Displasemen Sambungan Geladak-Kaki Model Global                    | IV –10  |



## DAFTAR GAMBAR

|  | Halaman  |
|--|----------|
| Gambar 1.1 <i>Flow Chart</i> Tugas Akhir   | I – 7    |
| Gambar 2.1 Struktur <i>Jack-Up</i> dengan 3 Kaki ( <i>Legs</i> ) tipe <i>Truss</i>     | II – 5   |
| Gambar 2.2 Skema Dasar Analisa Getaran   | II – 11  |
| Gambar 2.3 Skema <i>SDOF</i> tanpa <i>Damping</i> dengan <i>Free Body Diagram</i> –nya | II – 11  |
| Gambar 2.4 <i>Free Body Diagram</i> <i>D' Alembert</i>                                 | II – 13  |
| Gambar 2.5 <i>Free Body Diagram</i> getaran paksa dengan <i>force Excitation</i>       | II – 13  |
| Gambar 2.6 Model <i>SDOF</i> untuk analisa terhadap Respon Gempa Bumi                  | II – 17  |
| Gambar 2.7 Spektrum Respons Elastik untuk Gempa menurut <i>API RP2A 1993</i>           | II – 22  |
| Gambar 3.1 Model Kaki <i>Jack-Up</i> per <i>Bay</i> yang Akan Dianalisa                | III – 6  |
| Gambar 3.2 Penampang Kaki dan Sistem <i>Pinions</i> pada <i>Chord</i>                  | III – 6  |
| Gambar 3.3 <i>Detailed Model</i> Struktur Kaki <i>Jack-Up</i>                          | III – 7  |
| Gambar 3.4 Model <i>Deck</i> dan <i>Jack House</i>                                     | III – 9  |
| Gambar 3.5 Model Ideal <i>Spud Cans</i>  | III – 11 |
| Gambar 3.6 Properti Dinamis Model <i>Deck-Leg Connection</i>                           | III – 13 |
| Gambar 3.7 Properti Dinamis Model <i>Soil-Leg Interaction</i>                          | III – 15 |
| Gambar 3.8 Model Global Struktur <i>Jack-Up</i> dengan <i>K-Bracing</i>                | III – 16 |
| Gambar 3.9 Gaya Gelombang pada Silinder Tegak  | III – 20 |
| Gambar 3.10 Orientasi Arah Gaya Gelombang pada Silinder Miring                         | III – 22 |
| Gambar 3.11 Formulasi Koefisien <i>Drag</i> untuk Gaya Gelombang Pada <i>Chord</i>     | III – 24 |
| Gambar 3.12 Arah Datang Gelombang ke Struktur <i>Jack-Up</i>                           | III – 25 |
| Gambar 3.13 Kurva Spektrum Respons Percepatan Gempa di <i>Poleng</i>                   | III – 27 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|            |   |
|------------|---|
| Lampiran A | Data dan Pembebanan Lingkungan                            |
| Lampiran B | Parameter Perancangan dan Model Acuan                     |
| Lampiran C | Analisa Respons dan Tegangan <i>Ultimate</i>              |
| Lampiran D | Output Respons Struktur dengan <i>GT. Strudl</i> versi 25 |
| Lampiran E | Lembar Konsultasi   |



## DAFTAR NOTASI

|                 |   |
|-----------------|---|
| $F_s$           | <i>gaya pegas (spring force)</i>                      |
| $F_d$           | <i>gaya redaman (damping force)</i>                   |
| $F_i$           | <i>gaya inersia (inertia force)</i>                   |
| $k$             | <i>konstanta pegas</i>                                |
| $c$             | <i>koefisien redaman (damping)</i>                    |
| $M$             | <i>massa struktur</i>                                 |
| $v(t)$          | <i>respon displasemen pada saat t detik</i>           |
| $\dot{v}(t)$    | <i>respon kecepatan pada saat t detik</i>             |
| $\ddot{v}(t)$   | <i>respon percepatan pada saat t detik</i>            |
| $\omega$        | <i>frekuensi sirkular</i>                             |
| $P_{eff}(t)$    | <i>gaya gempa efektif yang mengenai struktur</i>      |
| $v_g(t)$        | <i>displasemen akibat gerak tanah (ground motion)</i> |
| $\dot{v}_g(t)$  | <i>kecepatan gerak tanah</i>                          |
| $\ddot{v}_g(t)$ | <i>percepatan gerak tanah</i>                         |
| $S_v$           | <i>spectral pseudo-velocity</i>                       |
| $S_d$           | <i>spectral displacement</i>                          |
| $S_a$           | <i>spectral pseudo acceleration</i>                   |
| $T_n$           | <i>periode natural struktur</i>                       |
| $f_n$           | <i>frekuensi natural struktur</i>                     |
| $\zeta$         | <i>rasio redaman (damping ratio)</i>                  |
| $F_y$           | <i>tegangan luluh (yield)</i>                         |

|           |   |
|-----------|---|
| $F_t$     | <i>tegangan tarik (tension)</i>                               |
| $F_a$     | <i>tegangan tekan (compress) ijin</i>                         |
| $F_{xe}$  | <i>tegangan local buckling elastik</i>                        |
| $F_{xc}$  | <i>tegangan local buckling inelastic</i>                      |
| $F_b$     | <i>tegangan bending ijin</i>                                  |
| $f_y$     | <i>tegangan geser (shear) maksimum</i>                        |
| $V$       | <i>gaya geser transversal</i>                                 |
| $f_{vt}$  | <i>tegangan torsional maksimum</i>                            |
| $E$       | <i>modulus elastisitas material</i>                           |
| $KF_x$    | <i>konstanta pegas horizontal x pada deck-leg connection</i>  |
| $KM_z$    | <i>konstanta pegas rotasional z pada deck-leg connection</i>  |
| $KF_{xs}$ | <i>konstanta pegas horizontal x pada soil-leg interaction</i> |
| $Kf_{ys}$ | <i>konstanta pegas vertikal y pada soil-leg interaction</i>   |
| $KM_{zs}$ | <i>konstanta pegas rotasional z pada soil-leg interaction</i> |
| $R$       | <i>radius efektif Spud Can</i>                                |
| $G$       | <i>modulus geser tanah</i>                                    |
| $F_w$     | <i>gaya gelombang</i>   |
| $F_d$     | <i>gaya drag pada struktur</i>                                |
| $C_d$     | <i>koefisien drag</i>   |
| $C_m$     | <i>koefisien inersia</i>                                      |
| $u$       | <i>kecepatan horisontal partikel air</i>                      |
| $a_x$     | <i>percepatan horizontal partikel air</i>                     |
| $\rho$    | <i>massa jenis air laut</i>                                   |



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 LATAR BELAKANG

Seiring dengan semakin banyaknya penemuan ladang minyak dan gas bumi di lapangan lepas pantai Indonesia pada saat ini yang cenderung mengarah ke perairan dalam, maka perkembangan rancang bangun struktur anjungan lepas pantai juga semakin mengarah pada keandalan struktur terhadap kondisi laut yang ganas. Untuk fasilitas pengeboran, *Jack-Up Platform* merupakan anjungan lepas pantai yang hingga sekarang ini paling banyak dipakai guna keperluan tersebut, meskipun pada perkembangan selanjutnya fungsinya bisa meluas seperti menjadi anjungan operasi pengolahan minyak. *Jack-Up* atau yang disebut juga “ *Self Elevated Platform Barge* ” merupakan kombinasi konsep antara anjungan terpancang dengan anjungan terapung, di mana memiliki kelebihan pada struktur kakinya yang dapat dikendalikan (dinaikan atau diturunkan) sesuai dengan kondisi laut tempat operasinya.

Keistimewaan dan inti kekuatan struktur *Jack-Up* pada kondisi operasi terletak pada struktur kaki yang bisa memakai tipe tertutup atau tipe rangka. Pada struktur rangka (*truss type*), kekuatan konstruksi juga tergantung pada jumlah *chord* dan bentuk *brace*, baik horisontal maupun diagonal. Suatu kaki *Jack-Up* tipe *truss* dengan konfigurasi tertentu mungkin saja memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban gelombang, arus, dan angin pada kondisi operasi, namun belum tentu mempunyai *response* yang baik terhadap beban gempa yang terjadi pada dasar laut tempat penetrasi struktur kakinya. Apabila struktur *Jack-Up*

ini ditempatkan di perairan Indonesia, maka analisa dinamis kekuatannya terhadap bahaya gempa dasar laut perlu dipertimbangkan, mengingat Indonesia tergolong dalam daerah seismik aktif di dunia. Tiga jalur gempa di dunia, dua di antaranya bertemu di Indonesia, (Bea, Robert; 1997) yaitu :

1. Jalur *Circum Pacific Earthquake Belt / Great Earthquake Belt*, meliputi daerah Sulawesi Selatan dan Papua.
2. Jalur *Alpide Earthquake Belt / Trans Asiatic Earthquake Belt*, meliputi daerah Bukit Barisan, Lepas Pantai Pulau Jawa, Sunda Kecil, dan Maluku.

Berangkat dari latar belakang tersebut, maka penulis akan mencoba melakukan analisa perilaku untuk mengetahui perbedaan besarnya respon dan kekuatan yang terjadi pada struktur kaki *Jack-Up* tipe *Truss* (rangka) yang disebabkan oleh gempa. Dalam hal ini struktur kaki yang akan dianalisa dibagi dalam tiga konfigurasi *Bracing* yang berbeda, yaitu : *K-Brace*, *Z-Brace*, dan *X-Brace*.

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Berapa besar respon dan kekuatan *ultimate* struktur kaki *Jack-Up* tipe *truss* dengan konfigurasi *Bracing* bentuk K, Z, dan X akibat beban gempa
2. Bentuk konfigurasi *Bracing* mana yang memiliki kekuatan paling baik terhadap beban gempa



### 1.3 TUJUAN

Dari permasalahan yang ada di atas, maka tujuan yang hendak dicapai adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui besar respon dan kekuatan *ultimate* struktur kaki *Jack-Up* tipe *truss* dengan konfigurasi *Bracing* bentuk K, Z, dan X akibat beban gempa
2. Menentukan bentuk konfigurasi *Bracing* yang memiliki kekuatan paling baik terhadap beban gempa

### 1.4 MANFAAT

1. Pemodelan struktur *Jack-Up* di sini ditujukan bukan untuk mendapatkan nilai respon yang representatif, tetapi hanya untuk melihat *trend* (kecenderungan) yang terjadi pada tiap model pada kondisi lingkungan dan beberapa parameter perancangan yang sama.
2. Hasil studi ini bisa digunakan sebagai salah satu acuan dalam perancangan dan analisa kekuatan struktur *Jack-Up Rig / Platform* secara global, khususnya pada analisa dinamis atau analisa seismik, yang ternyata mempunyai kriteria tersendiri dalam pemodelannya (mempunyai sedikit perbedaan dengan pemodelan struktur *Jacket*).

### 1.5 BATASAN MASALAH

Agar lebih memudahkan dalam analisa sehingga dapat dicapai suatu tujuan yang diharapkan, maka batasan-batasan yang diambil adalah sebagai berikut :

- Model struktur awal *Jack-Up* 3 kaki dengan 3 *Chord* yang dianalisa sebagai *case study* adalah “ *Dyvi Gamma* “ *Jack-Up Rig* milik *Dyvi Offshore, Norwegia* yang dioperasikan di *Block1/1-9 Norway Offshore*
- Lokasi studi untuk penempatan model *Jack-Up* adalah di *Poleng Field*, daerah lepas pantai sebelah barat Pulau Madura milik *Kodeco Energy Company Ltd.*
- Perubahan dilakukan pada bentuk konfigurasi *Bracing*, diameter, ketebalan, serta jumlah *bay* dengan mengacu bahwa masing – masing model memiliki berat efektif (*Murdjito, 1997*) yang relatif sama, panjang total struktur kaki yang sama, serta jarak spasi *Chord* yang sama pula
- Tidak terdapat penambahan / pengurangan ketebalan pada tiap *bay* pada *Chord* maupun *Braces* untuk setiap model rancangan (ketebalannya seragam)
- Struktur kaki dan geladak dimodelkan dalam bentuk *rigid*
- *Displacement* struktur pada kondisi awal adalah nol (0)
- Beban gelombang dianalisa secara statis dua dimensi, sedangkan beban gempa dianalisa secara dinamis dengan metode spektrum respon rancangan *API-RP2A 1993*
- Analisa struktur lokal dilakukan pada satu kaki untuk tiap jenis konfigurasi *Brace* guna mendapatkan displasemen maksimum dan tegangan maksimum yang terjadi, sedangkan analisa struktur global dilakukan pada struktur geladak dan tiga kaki *Jack-Up* dilakukan untuk memperoleh respon global menurut prosedur dari *Det Norske Veritas (Dnv, 1984)*
- Beban vertikal berupa berat geladak dan *payload* adalah sama untuk tiap jenis model rancangan

- Hasil yang diambil adalah *output* dari analisa yang dilakukan terhadap beban kombinasi antara beban gelombang, beban gempa, dan beban vertikal untuk tiap model

## 1.6 METODOLOGI PENELITIAN

Langkah–langkah pengerjaan Tugas Akhir ini , adalah sebagai berikut :

### 1. Studi Literatur.

Pelaksanaan studi literatur meliputi seleksi *paper-paper*, jurnal ilmiah, dan buku-buku yang berkaitan dengan masalah *Jack-Up* dan analisa struktur lepas pantai terhadap gempa.

### 2. Pengumpulan Data Struktur.

Data struktur *Jack-Up* meliputi dimensi, material, berat, dan bentuk keseluruhan yang diambil dari “ *Dyvi Gamma Jack-Up Rig* “ (DnV, 1984) baik kaki maupun *deck*.

### 3. Pengumpulan Data Lingkungan.

Data lingkungan baik kondisi perairan, tanah dasar laut, maupun seismologi diambil untuk lokasi studi di *Lapangan Poleng* milik *Kodeco Energy Co. Ltd.* sebelah barat Pulau Madura (Worley, C.Ltd, 2000).

### 4. Perhitungan Beban.

Perhitungan beban *deck* dilakukan berdasarkan data berat struktur dan peralatan yang ada untuk luasan *deck* tersebut. Perhitungan beban gelombang didasarkan pada teori Persamaan *Morrison* (Chakrabarti, S.K, 1987), sedangkan perhitungan beban gempa dilakukan menurut metode spektrum respon rancangan *API-RP2A*.



5. Penentuan Ukuran Awal dan Konfigurasi *Bracing*.

Penentuan ukuran utama *tubular member* dan konfigurasi *bracing* untuk tiap model mengacu pada standar kriteria dan parameter perancangan untuk struktur *Jack-Up* sebagai *fixed* dan *mobile platform*.

6. Pemodelan dan Analisa Struktur *Jack-Up*.

Model struktur lokal untuk struktur kaki tipe rangka (*truss*) dibuat menjadi tiga model, masing-masing untuk model *K*, *Z*, dan *X-Brace*. Model struktur global merupakan integrasi dari ketiga struktur kaki dengan struktur *deck*.

Analisa struktur baik global maupun lokal dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *GT. Strudl versi 25* untuk mendapatkan respon dan kekuatan maksimum struktur yang diinginkan.

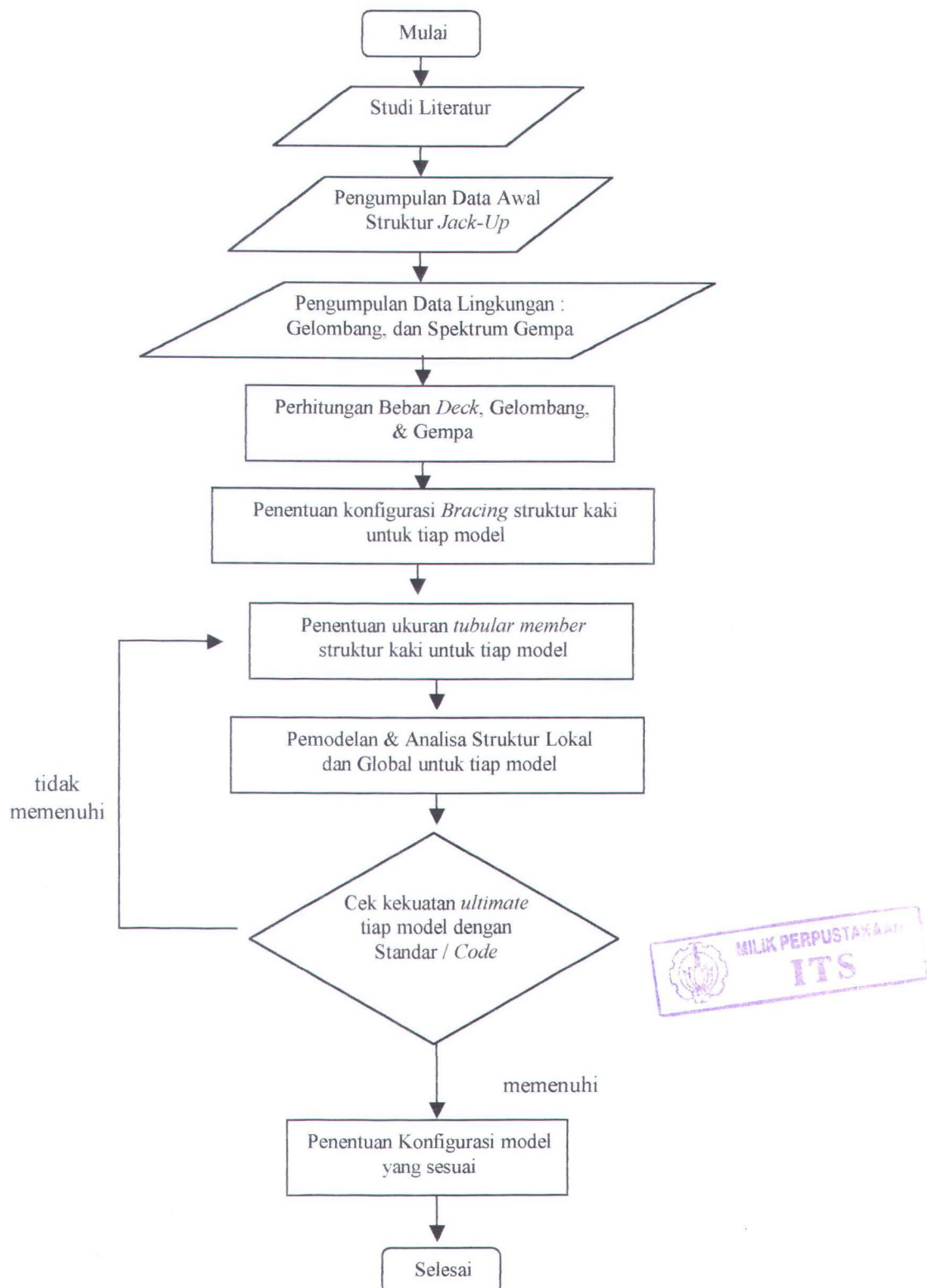
7. Pengecekan terhadap Standar / *Code*.

Pemeriksaan dilakukan tiap model untuk menentukan apakah kekuatan *ultimate* akibat pembebanan gelombang dan gempa sudah memenuhi kriteria kekuatan menurut standar yang dipakai, sehingga dapat ditentukan apakah model struktur dianggap sudah layak atau belum.

8. Penentuan Konfigurasi yang Sesuai.

Dari hasil pemeriksaan kekuatan terhadap standar dan besarnya respon yang didapat, apabila telah memenuhi, maka akan didapat konfigurasi struktur *Jack-Up* yang memiliki kekuatan paling baik terhadap beban gempa.

Diagram alur pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :



Gambar 1.1 Flow Chart Tugas Akhir

---

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Proses perancangan menurut Rosyid, D.M (*Rosyid, 1996*) merupakan proses berulang dan berlangsung secara kontinyu sesuai dengan spiral perancangan. Salah satu yang menjadi tahapan penting dalam spiral perancangan tersebut adalah pengembangan konsep analisa struktur anjungan lepas pantai yang meliputi jenis, tata letak, dan geometri struktur. Pemilihan konsep struktur merupakan tahapan pertama yang sangat penting bagi keberhasilan struktur anjungan dalam menjalani fungsinya.

Akhir – akhir ini telah banyak *Jack-Up Rig* dibangun oleh beberapa fabrikator struktur lepas pantai, sementara itu para teknisi dan peneliti masih mempelajari permasalahan teknis dan rekayasa dari struktur tersebut khususnya pada respon dinamis akibat gelombang, serta beban lain yang bersifat dinamis, termasuk di dalamnya beban gempa. Eksperimen yang dilakukan oleh Youchi Hattori (*Hattori et. al., 1981*) menyebutkan bahwa penting kiranya untuk menginvestigasi karakteristik getaran (vibrasi) dari *Jack-Up Rig* untuk menjamin keberhasilan dalam desain. *Finite Element Method* cocok untuk perhitungan frekuensi *natural*, tetapi ada beberapa aspek yang belum diketahui yang perlu untuk dipelajari, seperti ; massa semu kaki dalam air, dan kondisi tumpuan dari tanah dasar laut.

Penempatan kaki *Jack-Up* oleh struktur *Spud Can* tergantung pada kondisi lapisan tanah di mana kaki akan melakukan penetrasi, selain bentuk struktur *Spud*



*Can* itu sendiri. Hasil riset yang dilakukan oleh V. Rapoport dan AG Young dari *McClelland Engineers* (Rapoport, V and Young, AG, 1987) menyebutkan bahwa ketidaksesuaian desain *Spud Can* kaki *Jack-Up* dengan kondisi lapisan tanah bisa mengakibatkan kegagalan pondasi dengan terjadinya *Punch Through* dan *Slidding*.

Untuk melakukan analisa terhadap struktur *Jack-Up* perlu kiranya dilakukan pemodelan struktur yang sesuai sehingga hasil yang diharapkan bisa tercapai. Mengacu pada riset yang dilakukan oleh I.J Bradshaw (Bradshaw, I.J, 1987), bahwa pemodelan *Jack-Up* untuk analisa *static deterministics* bisa dilakukan dengan memodelkan seluruh elemen struktur secara lengkap dengan *FEM*. Namun untuk analisa secara dinamis, metode ini diyakini kurang efektif, sehingga cenderung memakai *Leg Stick Model* di mana hasil yang didapat pun tidak jauh berbeda. Acuan yang dipakai dalam pembuatan *Stick Model* dari *Jack-Up* ini berdasarkan kriteria dari *Det Norske Veritas* (DnV, 1984).

Suatu *Jack-Up Rig* yang ditempatkan pada daerah gempa (*seismic zone*) perlu mendapatkan pertimbangan serius terhadap efek getaran seismik pada respon struktur tersebut. Analog dengan penelitian yang dilakukan Gde Pradnyana dan Deni Irda Mazni (Pradnyana, G and Mazni, 2000), bahwa analisa yang perlu diperhatikan adalah aspek dari ukuran dan bentuk dari struktur *Jack-Up* dan juga gerak *Platform* akibat gelombang dan gempa. Aspek yang pertama berkaitan dengan *lumped mass*, kekakuan hidrostatik dari *deck*, *consistent mass*, kekakuan elastis, *damping* dari kaki, serta *damping* dan kekakuan pondasinya. Sedangkan aspek kedua meliputi gaya gelombang reguler serta percepatan gempa.

Dari sebagian hasil riset yang dilakukan oleh Murdjito dan R. Waluyo (Murdjito, 1997) menerangkan bahwa metode yang paling sesuai untuk model matematis struktur *Jack-Up* adalah *Finite Element Method (FEM)* dan *Discrete Element Method (DEM)*. Penggunaan *FEM* pada awal perancangan struktur akan memerlukan waktu dan biaya yang cukup besar dibanding dengan penggunaan *DEM*. Untuk konstruksi *Jack-Up* di perairan dalam, konstruksi rangka dengan *X- Brace* merupakan alternatif terbaik, sedangkan jumlah kaki *Jack-Up* yang ideal adalah tiga (3) kaki dengan *fixation system*.

## 2.2 LANDASAN TEORI

### 2.2.1 Perancangan Umum Struktur Jack-Up

Dalam kriteria perancangan bangunan lepas pantai, pada dasarnya dapat dikelompokkan ke dalam 3 (tiga) kategori, yaitu :

1. Bangunan Lepas Pantai Terapung ( *Mobile Offshore Drilling Units / MODU* atau *Floating Production Platforms / FPS* ), seperti : *Semisubmersibles, Drilling Ships, Tension Legs Platform (TLP)*, dan *Jack-Up Rig*.
2. Bangunan Lepas Pantai Terpancang ( *Fixed Offshore Platforms / FOP* ), seperti : *Jacket, Concrete Gravity Platforms (CGP), Monopod, Tripod*, dan *Guardian Platforms*.
3. Bangunan Lepas Pantai Lentur ( *Compliant Structures* ), seperti : *Articulated Tower* dan *Guyed Tower*.

Pada umumnya perancangan *MODU* sangat dipengaruhi oleh faktor – faktor seperti : kondisi laut yang bervariasi, minimasi gerakan pada waktu operasi untuk memperkecil tegangan pada *risers*, dan minimasi interferensi antara *risers* dan bangunan untuk mempermudah operasional dan mengantisipasi keadaan bahaya seperti *blow-out* dan kebakaran.

Stabilitas merupakan faktor yang sangat penting bagi *MODU*. Sebagai kriteria stabilitas suatu *MODU* pada umumnya adalah tinggi *metacentre*, respon *quasi – static* terhadap gaya angin, stabilitas awal, dan stabilitas pada saat kebocoran. Di samping kriteria di atas, beberapa biro klasifikasi dan konvensi internasional memberikan kriteria tambahan, yaitu : alternatif perhitungan stabilitas awal berdasarkan gaya angin dan gelombang dengan perhitungan cadangan energi pengembali yang ada pada *MODU*, serta kriteria yang langsung berhubungan dengan laut sebagai akibat benturan atau benda jatuh serta kriteria pada kerusakan kabel pengikat.

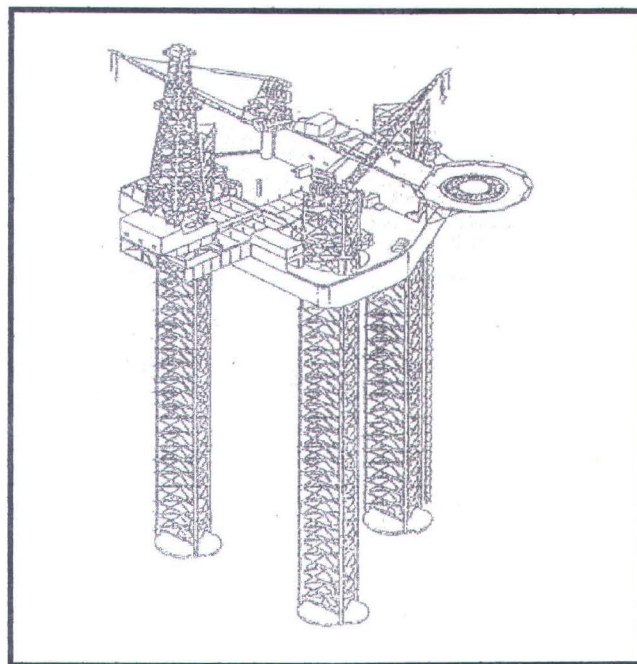
Hal lain yang perlu mendapat perhatian khusus adalah beberapa kriteria yang berhubungan dengan kekuatan struktur, yang mana pada perancangan kapal kurang mendapat perhatian, seperti : *serviceability*, kekuatan *ultimate*, keadaan batas untuk kelelahan struktur, kerusakan struktur akibat kecelakaan, dan kerusakan progresif.

*Fixed structures* menancap dan memperoleh kestabilan dari sistem pondasi tiang pancang atau dengan sistem beratnya sendiri selama masa operasinya. Sedangkan *mobile structures* berada relatif tetap di lokasi selama beroperasi dengan sistem penjangkaran (*anchoring*), tambatan (*mooring*), dan *dynamic positioning system*. Mengkombinasikan kedua keuntungan di atas, struktur *Jack-*



*Up* merupakan jenis *hybrid platform* antara kondisi tetap (diam) dan bergerak (*Liu, P, 1991*).

Konstruksi geladak (*deck*) *Jack-Up* merupakan konstruksi yang kedap air seperti halnya lambung tongkang (*barge*). Dengan demikian *Jack-Up* mempunyai daya apung (*buoyancy*) yang memungkinkan untuk berpindah tempat (*moveable*). Selain itu, *Jack-Up* dilengkapi dengan sistem *jacking* yang memudahkan sistem instalasi. Dengan adanya sistem *jacking* ini, posisi geladak dapat diatur sesuai dengan kebutuhan dan kondisi operasi. Sistem *jacking* ini yang menjadikan waktu instalasi *Jack-Up* lebih cepat dibanding dengan waktu yang dibutuhkan untuk instalasi anjungan terpancang. Karakteristik *Jack-Up* seperti disebutkan di atas menjadikan *Jack-Up* lebih stabil pada waktu operasi, serta memiliki kemampuan mobilitas yang tinggi. Dengan demikian diharapkan struktur *Jack-Up* mempunyai kemampuan operasi yang efektif dan efisien.



Gambar 2.1 Struktur *Jack-Up* dengan 3 Kaki (*Legs*) tipe *Truss*  
(*Murdjito, 1997*)

Fase operasi (*elevated phase*) merupakan fase terpenting dalam analisa kekuatan dan respon struktur *Jack-Up* terhadap beban dari luar. Kriteria terpenting pada fase operasi adalah besarnya momen pengembali yang dimiliki oleh *Jack-Up*, di mana nilainya dituntut harus lebih besar daripada momen guling (*overturning moment*) akibat pengaruh kondisi lingkungan. Besarnya perbandingan antara momen pengembali *Jack-Up* dengan momen guling maksimal yang diakibatkan oleh lingkungan tidak boleh kurang dari 1.3 (*Murdjito, 1997*). Besarnya momen pengembali (*restoring moment*) akan sangat tergantung pada besarnya beban fungsional, posisi titik berat beban tersebut terhadap sumbu putarnya, serta jarak antar kaki yang akan menentukan besarnya lengan momen pengembali *Jack-Up*.

Besarnya beban fungsional akan menentukan ukuran *platform*. Hal ini berhubungan dengan kebutuhan luas geladak dan kapasitas muat yang tersedia. Di sisi lain, ukuran *platform* juga ditentukan oleh posisi di mana kaki *Jack-Up* dirancang. Di samping itu, beban fungsional juga akan mengakibatkan beban aksial dan momen orde dua (*P-d effect*) pada kaki *Jack-Up* sebagai akibat pergeseran dari titik berat. Besarnya beban ini akan menambah besarnya tegangan yang ada pada kaki *Jack-Up*. Hal ini tentunya akan mempengaruhi kekakuan (*stiffness*) kaki *Jack-Up*, yang berarti juga akan mempengaruhi ukuran utama kaki *Jack-Up*.

Secara umum prosedur perancangan *Jack-Up* adalah sebagai berikut :

1. Analisa kondisi lingkungan.

Kondisi lingkungan tempat beroperasinya *Jack-Up* meliputi gelombang, arus, angin, kondisi tanah pondasi, getaran gempa, dan sebagainya. Lingkungan

tersebut berpengaruh sangat besar pada beban lingkungan yang bekerja pada struktur.

2. Menentukan beban fungsional.

Besarnya beban fungsional sangat ditentukan oleh berat struktur beserta fasilitasnya dan daya muat (*payload*). Besarnya *payload* yang harus mampu diangkut oleh *Jack-Up* tergantung pada permintaan *owner*.

3. Informasi Geologi.

Informasi geologi berisi informasi tentang sifat – sifat dan struktur mekanis tanah dasar laut di mana *Jack-Up* akan dioperasikan. Informasi ini sangat penting untuk menentukan terjadinya *punch through*, pemodelan pondasi, dan sifat – sifat pondasi yang mungkin terjadi. Oleh karena masih sulitnya mendapatkan data geologi yang lengkap pada daerah operasi lebih dari satu lokasi, maka informasi geologi ini sering hanya didasarkan pada data statistik dan asumsi.

4. Perhitungan beban luar.

Beban eksternal yang paling dominan untuk *Jack-Up* di daerah operasi laut dalam adalah beban hidrodinamis. Besarnya beban hidrodinamis akan sangat tergantung dalam penentuan teori gelombang, penentuan beban gelombang, serta transformasi parameter hidrodinamika ke beban hidrodinamis struktur.

5. Analisa model struktur.

Analisa model struktur mendefinisikan dimensi dan karakteristik konstruksi *Jack-Up* dalam formulasi matematis. Hal ini meliputi analisa respon struktur terhadap beban. Pertama yang dilakukan ialah dengan pemodelan *Jack-Up* secara global untuk mendapatkan ukuran utama *Jack-Up*. Setelah ukuran



utama didapatkan, maka pemodelan secara detail bisa dikerjakan untuk melihat karakteristik tiap elemen struktur.

#### 6. Evaluasi.

Hasil dari analisa di atas akan dievaluasi dan disesuaikan dengan kriteria perancangan yang ada untuk menentukan kelayakan hasil perancangan. Kriteria perancangan struktur *Jack-Up* ini pada umumnya telah didefinisikan oleh biro klasifikasi seperti *Det Norske Veritas (DnV)*, *American Petroleum Institute (API)*, *American Bureau of Shipping (ABS)*, *Lloyd Register (LR)*, dan sebagainya.

Prosedur perancangan *Jack-Up* ini secara umum masih relevan untuk perancangan *Jack-Up* di perairan dalam. Yang perlu diperhatikan di sini adalah penajaman definisi tiap – tiap langkah, seperti pendefinisian kondisi lingkungan dan perhitungan beban eksternal, perlu dilakukan peninjauan ulang atas parameter – parameter penting yang selama ini dipakai sebagai acuan.

### 2.2.2 Dasar – Dasar Analisa Dinamis

Tujuan dari analisa dinamis terhadap suatu struktur adalah untuk mengetahui respon dinamis struktur terhadap pembebanan yang merupakan fungsi waktu seperti *displacement*, atau perilaku dinamis struktur seperti frekuensi *natural* struktur atau periode *natural* struktur. Analisa dinamis secara umum memiliki tahapan sebagai berikut (*Craig, Roy, 1981*) :

- 1) Desain, meliputi bentuk, ukuran, dan properti struktur
- 2) Analisa, terdiri atas :

- a. Penentuan Model Analitis
- b. Penentuan Model Matematis
- c. Penentuan Respon atau Perilaku Struktur

3) Pengujian.

Merupakan pengujian secara laboratorium dari model yang *full scaled* atau dengan skala tertentu yang diperkecil. Namun, pengujian kadang tidak mesti dilakukan bila dengan analisa terhadap model saja sudah bisa mendapatkan hasil yang diinginkan.

Dalam analisa dinamis, massa dan kekakuan struktur merupakan parameter yang amat penting dalam menentukan frekuensi *natural* dan bentuk lendutan struktur. Dalam laporan Tugas Akhir ini sistem massa yang dipergunakan adalah *lumped mass system* (sistem massa tergumpal), yaitu massa struktur dianggap terpusat pada tiap *node* tertentu tergantung pada pembangian *node* pada struktur tersebut. Parameter lain adalah redaman yang biasanya dinyatakan dalam persentase terhadap redaman kritis.

Ada 2 (dua) cara pendekatan dasar yang dikenal untuk mendapatkan respon dinamis struktur (*Craig, Roy, 1981*), yaitu :

1. Deterministik.

Dalam pendekatan ini pola pembebanan dianggap sudah pasti, misalnya : dengan adanya data rekaman percepatan gempa tertentu.

2. Non – Deterministik.

Dalam pendekatan ini fungsi pembebanan terhadap waktu tidak diketahui. Untuk itu dipakai metode – metode statistik untuk mendapatkan respon dinamis struktur.

Terdapat 3 (tiga) konsep dasar utama dari suatu getaran atau eksitasi, yaitu seperti yang akan dijelaskan berikut :

1. *Input* (masukan)

*Input* di sini adalah gaya luar yang dikenakan pada suatu sistem, yang menyebabkan sistem tersebut bergetar, yang bisa dikategorikan dalam beberapa hal :

- a. *input* harmonik, yaitu suatu input yang secara matematis dapat ditulis sebagai  $\cos \omega t$ ,  $\sin \omega t$ , dan  $e^{+i \omega t}$
- b. *input* periodik, yaitu sembarang gaya luar dengan syarat bahwa gaya tersebut harus periodik
- c. *input* sembarang pulsa.
- d. *input* yang sama sekali sembarang, *input* yang demikian sering disebut sebagai “ *input statistik* “, karena penggunaan ilmu statistik sering diperlukan untuk merumuskannya dalam bentuk matematis.
- e. gaya interaktif, yaitu *input* yang tergantung dari gerakan yang dihasilkan. Jenis *input* ini adalah yang terjelek sebab tidak bisa diperkirakan sebelumnya, tetapi tergantung dari gerakan yang dihasilkan, sedangkan gerakan yang dihasilkan ini tergantung dari *inputnya*.

2. Sistem.

Sistem dari suatu getaran dapat dikategorikan menjadi :

- a. Sistem dengan satu derajat kebebasan (*Single Degree Of Freedom / SDOF*)
- b. Sistem dengan banyak derajat kebebasan (*Multi Degree Of Freedom / MDOF*)





- c. Sistem kontinyu (seperti : balok, pelat, dan sebagainya)
3. *Output* (keluaran)

*Output* adalah akibat yang terjadi karena dikenakannya *input* terhadap sistem. *Output* sering diukur dalam bentuk :

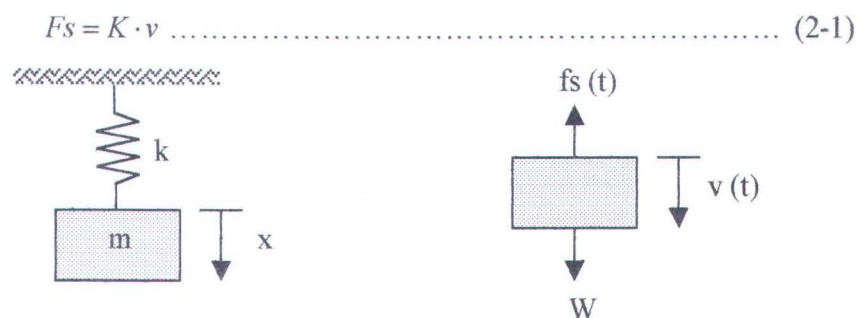
- a. displasemen (pergeseran, kecepatan, dan percepatan)
- b. tegangan (*stress*)



Gambar 2.2 Skema Dasar Analisa Getaran

(Craig, Roy; 1981)

Untuk getaran bebas *SDOF* tanpa *damping*, maka gaya geseran atau gaya redaman akan diabaikan, dan sebagai tambahan akan ditinjau sistem yang bebas dari gaya luar selama bergerak atau bergetar. Pada keadaan ini sistem tersebut hanya dikendalikan oleh pengaruh kondisi awal yaitu displasemen yang diberikan pada saat waktunya sama dengan nol ( $t=0$ ). Kekakuan pegas ditentukan berdasarkan hubungan antara gaya luar yang bekerja dengan perpanjangan yang dihasilkan :



Gambar 2.3 Skema *SDOF* tanpa *damping* dengan *Free Body Diagram*-nya

Bila massa dari sistem tersebut digeser sejauh  $x_0$  dari posisi kesetimbangan dan kemudian dilepas, maka massa tersebut akan bergetar. Dari *Hukum Newton II*, maka berlaku :

$$\sum F = m \cdot a \dots\dots\dots (2-2)$$

$$W - fs = \frac{W}{g} \cdot \ddot{v}(t) \dots\dots\dots (2-3)$$

Untuk harga  $v(t)$  yang kecil, maka  $fs$  ini adalah linier dan dapat ditulis :  $fs = k \cdot v(t)$ , sehingga persamaannya menjadi :

$$W - k \cdot v(t) = \frac{W}{g} \cdot \ddot{v}(t) \dots\dots\dots (2-4)$$

Sejauh ini di dalam penurunan persamaan di atas, pergeseran statis diikutsertakan, yaitu :  $v = v_0 + x$ , atau  $v(t) = v_0 + x(t)$  dengan kata lain  $v_0$  bukan fungsi waktu.

Kemudian dengan memasukkan harga ini ke persamaan sebelumnya, didapat :

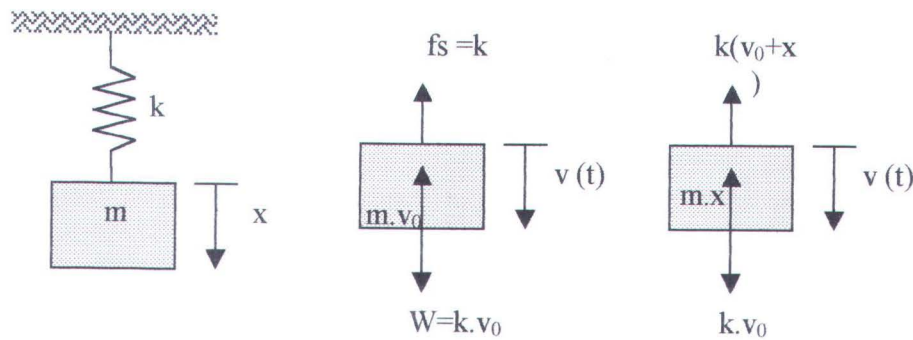
$$W - k(v_0 + x(t)) = m \cdot \ddot{x}(t) \dots\dots\dots (2-5)$$

Tetapi kita mengetahui bahwa  $W = k \cdot v_0$ , sehingga persamaan gerak menjadi :

$$-k \cdot x(t) = m \cdot \ddot{x}(t) \quad \text{atau}$$

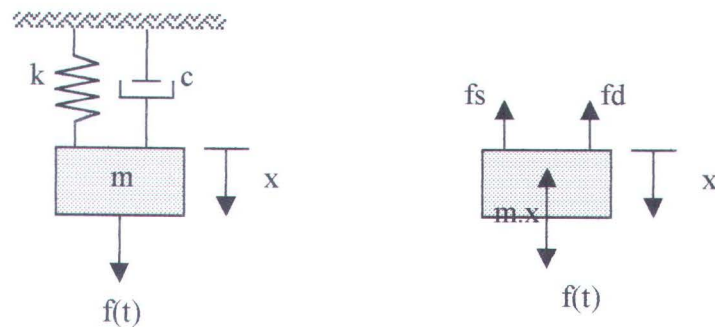
$$m \cdot \ddot{x}(t) + k \cdot x(t) = 0 \dots\dots\dots (2-6)$$

Sebuah pendekatan alternatif untuk mendapatkan persamaan (2-6) adalah penggunaan *Prinsip D' Alembert* yang menyatakan bahwa sebuah sistem dapat dibuat dalam keadaan setimbang secara dinamis dengan menambahkan sebuah gaya fiktif pada gaya – gaya luar yang biasa dikenal dengan *gaya inersia*. Penggunaan *Prinsip D' Alembert* memungkinkan pemakaian persamaan kesetimbangan untuk mendapatkan persamaan gerak sistem.



Gambar 2.4 Free Body Diagram D' Alembert

Untuk *SDOF* getaran paksa dengan eksitasi dari gaya luar (*Force Excitation*) berupa gaya yang berubah setiap saat dengan berubahnya waktu (sama dengan  $f(t)$ ), dapat dijelaskan seperti di bawah ini di mana  $f(t)$  = fungsi yang diketahui :



Gambar 2.5 Free Body Diagram getaran paksa dengan force excitation

Dengan menggunakan *Free Body Diagram* di atas dan *Prinsip D' Alembert*, jumlah gaya yang bekerja pada sistem sama dengan nol (keseimbangan dinamis), maka persamaannya gerak awalnya :

$$m \cdot \ddot{x} + fd + fs = f(t) \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t) \quad \dots\dots\dots (2-8)$$



dengan harga – harga  $f(t)$ ,  $m$ ,  $c$ , dan  $k$ , yang diketahui. Apabila dianggap bahwa  $f(t)$  adalah fungsi harmonik, yaitu :

$$f(t) = F \cos \omega \cdot t \dots\dots\dots (2-9)$$

di mana :

$F$  = amplitudo gaya aksial

$\omega$  = frekuensi eksitasi

maka penyelesaiannya mempunyai bentuk sebagai berikut :

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \dots\dots\dots (2-10)$$

Dengan  $x_h(t)$  sebagai penyelesaian homogen yang memenuhi persamaan berikut :

$$m \cdot \ddot{x}_h + c \cdot \dot{x}_h + k \cdot x_h = 0 \dots\dots\dots (2-11)$$

dan  $x_p$  sebagai penyelesaian partikular yang ruas kanannya tidak nol dengan penyelesaian :

$$x_p = A_3 \cos \omega \cdot t + A_4 \sin \omega \cdot t \dots\dots\dots (2-12)$$

dengan  $A_3$  dan  $A_4$  sebagai konstanta yang akan ditentukan.

Jadi, penyelesaian lengkapnya menjadi :

$$x(t) = e^{-\rho \omega t} (A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t) + A_3 \cos \omega t + A_4 \sin \omega t \dots\dots\dots (2-13)$$

Kita dapat mensubstitusikan persamaan (2-12) ke dalam persamaan (2-8) dan menentukan harga  $A_3$  dan  $A_4$  (dengan cara ini  $A_1$  dan  $A_2$  akan menghilang karena sudah memenuhi persyaratan homogen-nya). Setelah harga – harga  $A_3$  dan  $A_4$  diperoleh, maka harga  $A_1$  dan  $A_2$  bisa diperoleh dengan menggunakan syarat kondisi awal dari respon sistem.

Namun demikian kondisi yang disebut “ *steady state* “ (yang didapat dari penyelesaian partikular) yang terjadi setelah suatu sistem bergetar agak lama,

Karen getaran yang terjadi mula – mula disebut sebagai kondisi “ *transient* “ (dari penyelesaian homogen) berangsur – angsur akan menghilang.

Untuk  $x(t)$ , maka :

$$x_p(t) = A_3 \cos \omega \cdot t + A_4 \sin \omega \cdot t \dots\dots\dots (2-14)$$

Jika penyelesaian *steady state* tersebut dimasukkan lagi ke persamaan (2-8), maka penyelesaiannya menjadi :

$$\begin{aligned} x_p &= A_3 \cos \omega \cdot t + A_4 \sin \omega \cdot t \\ x(t_0) &= R_0 A \cdot e^{i\omega t}, \text{ dimana } A = A_3 - iA_4 \dots\dots\dots (2-15) \end{aligned}$$

Dengan menuliskan  $f(t)$  dalam notasi kompleks :  $f(t) = R_0 F e^{i\omega t}$  dan memasukkan  $x(t)$  dan  $f(t)$  ini ke persamaan diffrensial-nya, maka :

$$\begin{aligned} R_0 \{ A(-m\omega^2 + i\omega c + k) \} e^{i\omega t} &= R_0 F e^{i\omega t} \\ A(-m\omega^2 + i\omega c + k) &= F \dots\dots\dots (2-16) \\ A &= \frac{F}{(-m\omega^2 + k) - i\omega c} = A_3 - iA_4 \end{aligned}$$

Amplitudo  $x$  dan sudut fase  $\alpha$  dapat dicari dari pers. di atas sehingga didapat :

$$\begin{aligned} x &= A_3 + iA_4 = \frac{F/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\rho\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \\ \alpha &= \tan^{-1} \frac{\left[2\rho\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]} \dots\dots\dots (2-17) \end{aligned}$$

Jadi, responnya :  $x(t) = x \cos(\omega t - \alpha) \dots\dots\dots (2-18)$

### 2.2.3 Gempa Pada Bangunan Lepas Pantai

Gaya gempa pada struktur laut merupakan hasil dari gerak dasar tanah (*ground motion*) dan intensitas gaya tersebut tergantung pada massa dan kekakuan (*stiffness*) dari struktur serta sistem pondasinya. Tidak seperti beban lingkungan lainnya, gaya gempa pada umumnya direduksi besarnya seperti halnya pengurangan pada kekakuan strukturnya yang bisa mengakibatkan regangan inelastic dan tekukan (*buckling*) pada struktur atau elemen pondasi (API, 1993). Beberapa pengertian yang berkaitan dengan gempa, antara lain sebagai berikut :

1. Percepatan Gerak Tanah Relatif (*Effective Ground Acceleration*) :

Parameter ini merupakan suatu koefisien perancangan yang digunakan untuk menyatakan amplitudo percepatan gerak tanah secara halus seperti yang ada pada spectrum gempa rancangan.

2. Gerak Tanah Dasar (*Ground Motion*) :

Merupakan gerak getaran tanah sebagai hasil dari suatu gempa bumi. Gerak pada beberap titik dinyatakan pada riwayat waktu dari percepatan, kecepatan, atau displasemen.

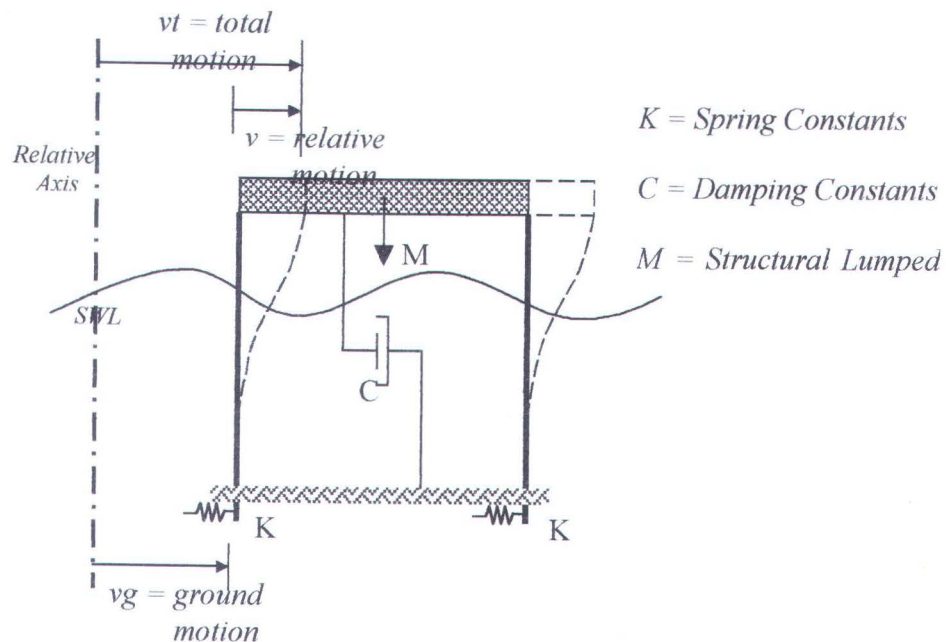
3. Response Spectrum (*Spektrum Respon*) :

Spektrum respon merupakan catatan sebagian percepatan gempa bumi yang menyatakan respon maksimum dari struktur dengan *Single Degree of Freedom (SDOF)*.

Untuk sistem *Single Degree Of Freedom (SDOF)* dengan *lumped mass*, bentuk yang paling sederhana dari masalah respon gempa bumi adalah pergeseran atau translasi dari titik – titik tumpuan yang sama. Model yang umum dan



sederhana untuk menggambarkan respon struktur *Jack-Up Rig* adalah seperti berikut :



Gambar 2.6 Model *SDOF* untuk terhadap Respon Gempa Bumi

(Clough, Ray W, 1970)

Dari dasar teori dinamika struktur, maka didapatkan :

Gaya Inersia (*Inertia*) :  $F_i = M \cdot \ddot{v} \dots \dots \dots (2-19)$

Gaya Redaman (*Damping*) :  $F_d = C \cdot \dot{v} \dots \dots \dots (2-20)$

Gaya Pegas (*Spring*) :  $F_s = K \cdot v \dots \dots \dots (2-21)$

Untuk model persamaan gerak diperoleh :

$$M \cdot \ddot{v} + C \cdot \dot{v} + K \cdot v = P(t) \dots \dots \dots (2-22)$$

Pada masalah gempa bumi, gerak eksitasi ditunjang oleh gerak relatif pada *support* (tumpuan) dari struktur, yaitu :  $v_g$  , seperti terlihat pada gambar 2.2, serta

tidak terdapat beban luar (*external loading*) atau dapat dikatakan  $P(t) = 0$ , sehingga persamaan gerak struktur menjadi :

$$F_d + F_i + F_s = 0 \dots\dots\dots (2-23)$$

Karena dalam kasus ini ada 2 (dua) model *motion*, maka persamaan percepatan gerak total menjadi :

$$\ddot{v}_t = \ddot{v} + \ddot{v}_g \dots\dots\dots (2-24)$$

Maka gaya inersia berubah menjadi :

$$F_i = M \cdot \ddot{v}_t = M \cdot \ddot{v} + M \cdot \ddot{v}_g \dots\dots\dots (2-25)$$

Dengan mengkombinasikan persamaan – persamaan di atas maka didapatkan persamaan gerak yang baru (tanpa perubahan pada gaya redaman dan pegas) :

$$M \cdot \ddot{v} + M \cdot \ddot{v}_g + C \cdot \dot{v} + K \cdot v = 0 \dots\dots\dots (2-26)$$

Atau dengan menempatkan masukan percepatan gerak tanah (*ground acceleration*) pada sisi kanan, maka diperoleh persamaan gerak :

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{v} + C \cdot \dot{v} + K \cdot v &= -M \cdot \ddot{v}_g \\ M \cdot \ddot{v} + C \cdot \dot{v} + K \cdot v &= P_{eff}(t) \end{aligned} \dots\dots\dots (2-27)$$

$P_{eff}(t)$  adalah gaya gempa efektif yang terjadi atau mengenai struktur. Gaya gempa efektif yang menimbulkan respon dinamik pada sistem tersebut diakibatkan oleh kenyataan bahwa suku gaya inersia bergantung pada gerak total, sedangkan gaya redaman dan gaya pegas hanya bergantung pada gerak relatif.

Respon gempa bumi dari *SDOF* dapat diselesaikan dengan menggunakan Integral *Duhamel*, dan penting kiranya untuk menegaskan bahwa beban gempa efektif diperoleh dari produk massa dan percepatan gerak tanah (*ground*

*acceleration*). Integral *Duhamel* untuk menyatakan respon struktur *SDOF* sistem *lumped mass* terhadap gempa adalah sebagai berikut :

$$v(t) = \frac{1}{\omega} \cdot V(t) \dots\dots\dots (2-28)$$

di mana  $V(t)$  adalah integral respon gempa bumi yang didefinisikan sebagai :

$$V(t) = \int_0^t \ddot{v}_g(\tau) \exp[-\xi \cdot \omega \cdot (t - \tau)] \sin \omega(t - \tau) d\tau \dots\dots\dots (2-29)$$

Perlu diperhatikan bahwa dalam pernyataan ini telah digunakan frekuensi tak teredam untuk menggantikan nilai yang teredam, dengan demikian perkiraan yang diberikan adalah *trivial* dibandingkan dengan ketidakpastian pada gerak gempa bumi  $v_g$  yang diasumsikan. Juga harus dicatat bahwa tanda negatif dari suku gaya gempa efektif diabaikan, biasanya pengertian respon tidak begitu penting dalam suatu analisa gempa bumi.

Evaluasi dari gerak relatif adalah adalah satu sasaran utama dari analisa respon gempa bumi; gerak total tentu saja dapat diperoleh dengan menjumlahkan perpindahan tanah, tetapi hal ini jarang diperhatikan. Ukuran utama lainnya dari respon gempa bumi adalah gaya yang berhubungan dengan deformasi elastik. Untuk sistem *lumped mass SDOF*, persamaan ini dapat dituliskan secara langsung sebagai :

$$f_s(t) = K \cdot v(t) \dots\dots\dots (2-30)$$

Akan tetapi, dalam analisa struktur yang lebih rumit seringkali memudahkan dengan menggunakan suatu formulasi pengganti dari gaya – gaya ini. Formulasi ini dapat diperoleh dengan catatan bahwa pada getaran bebas tak teredam, persamaan kesetimbangan dinamik akan berbentuk :

$$f_i(t) + f_s(t) = 0 \dots\dots\dots (2-31)$$



di mana, untuk gerak harmonis dirumuskan :

$$f_i(t) = M \cdot \ddot{v}(t) = -M \cdot \omega^2 \cdot v(t) \dots\dots\dots (2-32)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-28) dan (2.2.3-32) ke dalam persamaan (2-31), maka diperoleh gaya pegas elastik :

$$f_s(t) = M \cdot \omega^2 \cdot v(t) = M \cdot \omega \cdot V(t) \dots\dots\dots (2-33)$$

Kesamaan dari persamaan (2-30) dan (2-33) jelas kelihatan bahwa  $\omega^2 = K / M$ .

Persamaan (2-33) tidak menyatakan hubungan secara langsung bahwa  $\omega^2 v(t)$  adalah percepatan total dari massa, karena di samping gaya inersia, pada sistem biasanya bekerja gaya redaman. Pernyataan untuk percepatan total dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan (2-22) dan dengan catatan bahwa  $c/m = 2\xi\omega$  ; jadi :

$$\ddot{v}_i(t) = -2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \dot{v}(t) - \omega^2 \cdot v(t) \dots\dots\dots (2-34)$$

Sekarang jika diasumsikan bahwa suku redaman bisa diabaikan atas dasar bahwa gaya redaman kecil kontribusinya terhadap hubungan kesetimbangan, percepatan total diberikan secara perkiraan oleh persamaan berikut :

$$\ddot{v}_i(t) = -\omega^2 \cdot v(t) = \omega \cdot V(t) \dots\dots\dots (2-35)$$

Gaya gempa bumi efektif ( $Q(t)$ ) sebagai produk dari massa dan percepatan efektif kemudian dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q(t) = M \cdot \ddot{v}_i(t) = M \cdot \omega^2 \cdot v(t) = M \cdot \omega \cdot V(t) \dots\dots\dots (2-36)$$

Pada sebagian besar penyelesaian persamaan gerak atau penentuan respon struktur akibat gempa, biasanya hanya ditentukan dengan besar respon yang maksimum, seperti fungsi kecepatan. Harga maksimum dari fungsi respon ini